

## Résumé de thèse (Arnaud Rozes - LPC)

Cette thèse a porté sur la construction, puis la caractérisation, d'un détecteur dédié à la mesure de l'activité  $\beta^+$  induite lors des traitements d'hadronthérapie en vue de leur contrôle balistique. Lors de tels traitements, les tumeurs cancéreuses sont irradiées par un faisceau de protons ou d'ions. Ce type de thérapie est employé sur des tumeurs radiorésistantes ou localisées à proximité d'organes à risques, nécessitant une grande précision balistique. Les protons et les ions ont en effet comme propriété de déposer principalement leur dose en fin de course, sur une région de l'espace restreinte (phénomène connu sous le terme de pic de Bragg). Une problématique importante dans ce type de traitement est alors de contrôler la balistique du faisceau, notamment sa profondeur maximale, et ce idéalement en temps réel. Plusieurs méthodes peuvent être envisagées, l'une d'elles utilise le fait que lors du passage du faisceau dans une cible, des réactions nucléaires ont lieu entre les projectiles et les noyaux de la cible. Ces réactions produisent entre autres des émetteurs  $\beta^+$ . L'annihilation de ces  $\beta^+$  donne deux photons  $\gamma$  de 511 keV, et avec un système de type caméra TEP (Tomographie par Emission de Positons), on peut accéder à la mesure de la distribution de l'activité  $\beta^+$ , puis remonter à la balistique du faisceau. Nous avons donc entrepris la construction d'un démonstrateur de type TEP, utilisant une électronique à échantillonnage rapide. Ce détecteur (DPGA) comporte 240 canaux, avec un cristal de LYSO et un photomultiplicateur (PMT) par canal. Les PMTs sont regroupés par quatre sur une base et une carte pont diviseur (figure 1), puis des lignes de détection de 20 canaux (figure 2) sont assemblées pour former deux têtes de 6 lignes chacune (figure 3).



Figure 1 : ensemble de quatre PMTs connectés à leur carte pont diviseur.



Figure 2 : vue d'une ligne du détecteur.

Chaque ligne est lue par une carte ASM, assurant l'échantillonnage grâce à des circuits à capacités commutées (ASIC DRS 4), la numérisation et un premier niveau de trigger (sélection des signaux d'amplitude comprise entre deux seuils programmables).

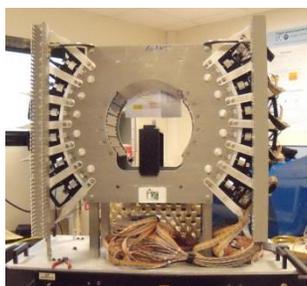


Figure 3 : vue d'ensemble du DPGA, avec 6 lignes de détection de chaque côté.

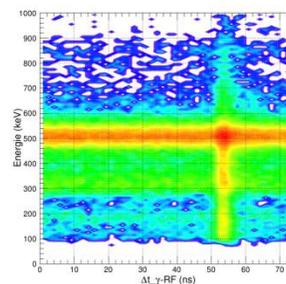


Figure 4 : Energie des photons en fonction de la différence entre leur temps d'arrivée et un temps de référence donné par la radiofréquence de l'accélérateur au GANIL. La période entre  $\sim 50$  et  $\sim 60$  ns correspond au déversement du faisceau, avec un bruit de fond plus important.

Les premières caractérisations du détecteur ont permis de mesurer ses résolutions en énergie (14%) et en temps (3 ns), et de mettre en évidence l'évolution du bruit de fond intrinsèque du lutécium en fonction des caractéristiques du faisceau. L'un des problèmes de l'utilisation de l'imagerie TEP pour le contrôle de la balistique du faisceau en hadronthérapie est le bruit de fond important dû aux nombreux photons gamma (dans la gamme d'énergie 1 – 10 MeV) issus eux-aussi des réactions nucléaires entre projectile et cible. Ces photons sont émis en quasi-coïncidence avec le passage des ions, alors que les émetteurs  $\beta^+$  ont une certaine durée de vie. De ce fait, la plus grande partie du signal intéressant pour la TEP est émis entre les passages des paquets d'ions. Dans certains cas, il est possible d'utiliser la radiofréquence de l'accélérateur pour identifier le temps de déversement des ions, périodes où le bruit de fond est important. On supprime alors des données la partie qui correspond à ce déversement, pour ne garder que les événements intéressants entre les paquets, là où le signal enregistré n'est pas corrompu par ce bruit de fond. Cette méthode, employée par exemple lors de tests au GANIL (figure 4), ne fonctionne pas au HIT. Toutefois il a été montré que des coupures simples en temps et en énergie permettraient de conserver des données utiles, même s'il n'est pas possible de distinguer la phase de déversement des ions.

Une évaluation préliminaire de la capacité de ce détecteur quant à la reconstruction de la distribution de l'activité  $\beta^+$  dans une cible a ensuite été effectuée sur les données et via une simulation. Le détecteur complet n'a pas été testé en faisceau à ce jour: les données concernent un fantôme avec des trous remplis de solution radioactive, et les simulations concernent ce même fantôme ainsi qu'un travail préliminaire sur un faisceau de proton de 86 MeV.

La première méthode développée est une méthode statistique de type MLEM. Il a été montré, sur le fantôme, qu'il était possible de reconstruire de façon satisfaisante une image de la source (ou de plusieurs sources distinctes) avec ce détecteur. La même méthode permet de reconstruire le pic de Bragg du faisceau de proton de 86 MeV.

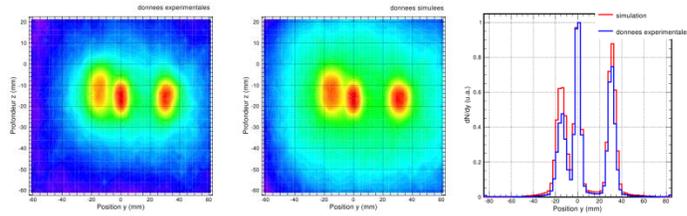


Figure 5 : image de trois trous du fantôme remplis de FDG (20 MBq) placés dans le champ de vue du DPGA, obtenue par une méthode itérative de type MLEM. À gauche les données expérimentales, au centre la simulation, à droite la comparaison des deux dans la direction verticale.

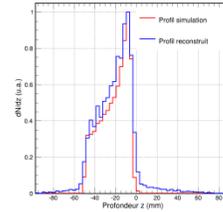


Figure 6 : exemple de reconstruction obtenue par la méthode du minimum d'approche. En rouge les positions vraies des annihilations, et en bleu les positions reconstruites par cette méthode.

La seconde méthode approxime le lieu d'annihilation du  $\beta^+$  par la distance minimum d'approche entre la ligne de réponse et l'axe du faisceau. Les simulations ont montré qu'une telle approximation n'introduisait pas de biais sur la profondeur reconstruite de l'annihilation. Cette méthode a aussi l'avantage de fournir une profondeur pour chaque interaction, d'être très simple à mettre en œuvre, et les résultats préliminaires semblent montrer qu'il est possible de reconstruire la profondeur du pic de Bragg dans la cible, avec un nombre d'événements compatible avec ce qui sera délivré par un faisceau clinique.

Les travaux de cette thèse ont été présentés à la conférence de Vienne en Instrumentation, VIC 2015 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216303424>).